神戸の減災研究会 WG4 「神戸市の地震動特性と中高層建築物の耐震補強に関する研究」

目次

1.	はじめに	2 -
2.	研究方法	3 -
2.1	建物の振動解析による倒壊判定手法の概要	3 -
2.2	倒壊判定を含めた耐震補強イメージと研究範囲	4 -
2.3	研究計画におけるフェーズ2の位置付け	5 -
2.4	研究の流れと本報告書の構成	7 -
3.	神戸市の地震動特性を考慮した入力地震動に関する検討	8 -
3.1	地震動レベルに関する検討	8 -
3.2	地震発生源に関する検討	- 14 -
3.3	地震動評価における不確実性に関する検討	- 18 -
4. 侄	J壊判定のための入力地震動作成フローの提案	- 23 -
4.1	入力地震動の作成に向けた考え方の整理	- 23 -
4.2	入力地震動作成フローの提案	- 24 -
5. ま	ことめ	- 26 -
参考文	「献	- 27 -
<付錡	長> 振動解析による倒壊判定手法の適用事例	- 28 -

1. はじめに

集合住宅等の中高層建物は一般に建物重量が大きいために, 0.6以上の ls 値を満足する従来の耐震補強方法 では、代表的な補強事例を図-1.1に示すように大規模な工事が必要となり、費用負担面から耐震化が進みにく い要因の一つになっている。一方、既往の ls 値のみにとらわれることなく、大地震後の再使用を前提としない 等の条件付きながら「振動解析による倒壊判定手法」により動的応答性状を検討する方法が提示されている¹。

振動解析を行うにあたっては、解析結果に大きく影響する入力地震動の作成が課題となる。特に、耐震診断 や設計、補強等に従事する実務者にとっては時間・費用・技術の各観点を踏まえた判断が必要となる。例えば、 エル・セントロ波、タフト波等の既往の観測波は比較的容易に入手できるが、解析地点の地盤条件による増幅 特性を考慮した波形を作成するには、地盤データを入手した上で別途解析(SHAKE 等)が必要であり、必要 な各地盤パラメータの設定に迷うことになる。また、入力地震動の作成から振動解析による倒壊判定までを一 人で全て実施できる実務者は限られるとともに、解析の各段階において種々の判断が必要であることから、実 務者ごとに結果のバラツキが生じやすい。よって、実務者の立場からは簡便で一義的な形で入力地震動が作成 可能な手法の開発やそのマニュアル化が望まれている。

近年、「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会」から、大阪府域を 地盤特性の観点からゾーニングした上で、5つの断層帯(上町、生駒、中央構造線、有馬ー高槻、六甲・淡路) 毎に膨大な破壊ケース数を想定して統計処理により作成された地表地震波(フラットタイプ、パルスタイプ) が詳細な解説とともに公開され、上町断層と生駒断層については地表加速度波形データが提供された。ただし、 これは大阪府域を対象にしているため、神戸市内に距離的に近い有馬ー高槻断層帯や六甲・淡路島断層帯につ いては公開されていない。

上記の背景から、本研究ではより合理的な耐震診断・補強方法の実現により、耐震診断や設計、補強等に従 事する実務者の作業負担軽減を図り、中高層建物の耐震化促進に貢献することを目的として、今後30年程度の 建物使用期間の中で発生しうる最大級の地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊はしない性能の確保を 目的とした「振動解析による倒壊判定手法」の耐震診断・補強実務への導入可能性を検討する。

具体的には神戸市域の膨大な地盤情報が集積された高密度地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN²」を活用し、神戸市特有の地盤特性を反映した入力地震動を作成するための要件を整理して、実務者が入力地震動を 選択する際の考え方を提示する。なお、本研究は2015年度から2017年度までのフェーズ1と、2018年度から 2020年度までのフェーズ2に分けて研究を行う計画であったが、フェーズ2は新型コロナの影響で研究活動を 中断せざるを得ない状況になったため、2021年度まで延期して実施することとした。本報では主としてフェー ズ2における研究成果を報告する。フェーズ1の研究成果の詳細は、「神戸の減災研究会研究成果報告書(平 成27~29年度)³」を参照されたい。また参考として、フェーズ1において耐震補強前と補強後の建物を対象 に実施した振動解析による倒壊判定の適用可能性に関するケーススタディの結果を巻末に再掲している。



図-1.1 中高層集合住宅の耐震補強事例

2. 研究方法

2.1 建物の振動解析による倒壊判定手法の概要

図-2.1.1 に「振動解析による倒壊判定手法」の概要を示す。まず、図-2.1.1 a)に示すような建物の振動解析 モデルを構築する。本研究では、振動解析モデルとして(1) 質点系解析モデルと(2) 3 次元立体フレーム解析モ デルの2 種類を構築する。次に地震動を振動解析モデルに入力し、振動解析結果から得られた各階の最大応答 層間変形角を基に建物倒壊の可能性を判断する。図-2.1.1 b)に最大応答層間変形角の例を、表-2.1.1 に判断基 準の例を示す。





a) 建物の振動解析の例(3次元立体フレームモデルの場合) b) 最大応答層間変形角の例 図-2.1.1 建物の振動解析による倒壊判定手法の概要

表-2.1.1 倒壊判定基準の例¹⁾

領域	最大応答層間変形角(rad)	推定損傷状況
Ι	1/100以下	倒壊はせず、構造体や内部の損傷も少ない
П	1/100 を超え 1/50 以下	倒壊はしないが、構造体の損傷がある
Ш	1/50 以上	部分的または建物全体が倒壊する可能性が大きい

2.2 倒壊判定を含めた耐震補強イメージと研究範囲

「振動解析による倒壊判定手法」を含めた耐震補強の進め方を図-2.2.1 に示す。まず,通常の耐震診断(2) 次診断,3 次診断)を実施する。次に,振動解析による検証を行いたい実務者が,対象建物の建設地点におけ る表層地盤特性が考慮された入力地震動(地表加速度波形等)を振動解析プログラムに取り込み時刻歴応答解 析を実行する。その解析結果を基に補強の費用対効果を考慮して,建物所有者と相談しながら補強計画を以下 のように段階的に進めることを想定している。

1次的補強: 極脆性柱や下階壁抜け柱など重要かつ壊れやすい部材(第2種構造要素)に対して、比較的 容易かつ安価に工事できるスリットや柱巻き補強を行い、建物の決定的な弱点を改善する。

2次的補強: ブレースなどの壁要素を既存建物に付加することで保有水平耐力を増強して目標 Is 値を満足 させる。(公的機関の評価取得や補助金申請が必要な場合)



図-2.2.1 倒壊判定を含めた耐震補強イメージと研究範囲

本研究の範囲を図-2.2.1 に併せて示す。本研究では1)「振動解析による倒壊判定手法」の適用可能性,および2)振動解析に必要な入力地震動に関する検討について検討を行う。1) 倒壊判定手法の検討では、ケーススタディとして耐震補強が進んでいない中高層集合住宅を対象に具体的な解析を実施し、大地震後の再使用を前提としない条件付きでその適用可能性を検討する。2) 入力地震動に関する検討では建物倒壊の可能性を検討するにあたり、神戸市域においてどのような地震動を想定して設定すべきかを検討する。

2.3 研究計画におけるフェーズ2の位置付け

本研究は表-2.3.1に示すように、フェーズ1とフェーズ2の2段階に分けて実施した。

フェーズ1	実建物を対象に振動解析による倒壊判定に関するケーススタディを実施し、
(2015.8~2018.7)	耐震補強検討のための入力地震動の要件に関する中間とりまとめを行う。
フェーズ2	
(2018.8~2022.3)	フェース」で整理した要件を踏まえて、人力地震動の作成に関する検討を行う。

表-2.3.1 研究フェーズと実施概要

フェーズ1では、実建物を対象に補強前と補強後の振動解析モデルを構築し、仮想の建設地点を設定して倒 壊判定に関するケーススタディを実施した。また、耐震補強検討のための入力地震動の要件に関する中間とり まとめを行い、入力地震動の設定上の主な課題と対応の方向性について、以下の3点を整理している。

1)課題1:地震動レベルの設定

本研究の目的はより簡便で安価な耐震補強により、今後 30 年程度の建物使用期間の中での発生が想 定される地震動に対して、倒壊を回避可能な耐震安全性を確保することにある。したがって、低頻度・ 大規模の地震動ではなく、例えば「30 年内の発生確率が 3%(再現期間:約1,000 年)の地震動」など、 使用期間内で発生する可能性が比較的高い、現実的な地震動レベルを目安に入力地震動を設定すべきで ある。

2)課題2:地震発生源の選択

実務者が解析対象地点において,構造物の耐震性評価に最も適した入力地震動を簡単に入手できるこ とが理想であるが,対象とする想定地震,つまり,地震発生源の選択は難しい課題である。したがって, 入手可能な地震動を活用し,様々な地震発生源を設定して検討した上で,解析対象地点における地震動 の特性を包含した入力地震動を設定すべきである。

3)課題3:地震動評価における不確実性の扱い

「震源断層を特定しにくい地震」の扱いについて、比較的発生頻度が高いマグニチュード7クラスの 地震が発生した場合、建設地点の近傍では大きな地震動となる可能性がある。確率論的な地震動評価で は、「震源断層を特定しにくい地震」を含めた評価が行われているが、地震領域を定めて、その領域内 に発生する地震群としての特徴を確率モデルとして取り扱っているため、必ずしも建設地点の近傍で発 生することが仮定されているわけではない。技術的にはこのような震源位置の影響や、あるいは断層パ ラメータのばらつきを考慮して、数多くの地震動を作成することは可能だが、膨大な作業量になり実務 的には現実的ではないと考えられる。したがって、地震動予測に関する不確実性考慮して予測できる地 震動の範囲を鑑みて、一般的に考えられる地震動レベルを適用する方法が合理的である。

フェーズ 2 では上記の課題1)~3) について検討を行い,建物の振動解析による倒壊判定に必要な入力地 震動の作成フローを提案した。なお、フェーズ1では上記以外に以下の課題も議論がなされたが、検討におけ る難易度と優先度の観点から今後取り組むべき課題として整理し、フェーズ2の検討対象からは除外した。 <今後取り組むべき課題>

・ 短い間隔で複数回の揺れが発生した場合の対応:

2016年の熊本地震は4月14日にマグニチュード6.5の前震が発生し、2日後の16日にはマグニチュ ード7.3の本震が発生して、いずれの地震も最大震度7が観測された。また、2004年10月23日に発生 した新潟県中越地震では、午後5時56分にマグニチュード6.8の本震により新潟県内では震度7が観測 された後、大きな余震が発生し、本震発生後2時間以内に2回の震度6強と1回の震度6弱が記録され た。短い間隔で大きな地震が発生すると、強いゆれが建物に複数回作用することで被害が拡大する可能 性があることを念頭におく必要がある。特に、本研究では大きな地震を経験した場合に建物を再使用し ないことを前提にしており、2回目の地震に対しては倒壊する場合があることを建物所有者や居住者に 十分に説明して理解を得ておく必要がある。

・ 地震波形の公開方法:

各サイトの地盤特性を考慮した入力地震動が示され、かつ、振動解析による耐震診断、耐震補強のあ り方が示されると実務者や市民にとってコスト面でのメリットが大きい。設計スペクトルのような指標 が提案できることが望ましいが、地震動の公開方法について関係者と協議する必要がある。また、建物 所有者や居住者に対して絶対に倒壊しないと断定することはできないため、設定以上の大きさの地震が 発生した場合には倒壊する可能性があることも説明するような配慮が必要である。

2.4 研究の流れと本報告書の構成

フェーズ2における研究の流れと本報告書の構成を図-2.4.1に示す。

第1章では、本研究の背景と目的を説明し、第2章では研究方法と本報告書の構成を示した。

第3章では、神戸市の地震動特性を考慮した入力地震動に関する検討を実施した。

3.1 節では、現実的な地震動レベルの設定に関する検討を行った。具体的には、今後 30 年程度の建物使用期間中の地震発生確率を考慮するため、防災科学技術研究所が公開している J-SHIS を用いて、神戸市全域における地表最大速度の分布に関する情報の収集と分析を行った。

3.2 節では、地震発生源の選択に関する検討を行った。具体的には、神戸市域において入手可能な想定地震の 波形を収集し、仮想の建設地点2か所における工学的基盤上の最大速度に関する情報を確認した。

3.3 節では、地震動評価における不確実性について検討を行った。具体的には、防災科学技術研究所の強震観 測網 K-NET と KiK-net,および気象庁の地震観測記録から震央距離 10km 未満の観測地点で記録された波形を 抽出し、地震動レベルと応答スペクトルについて考察を行った。

第4章では入力地震動の作成フローについて検討を行った。

4.1節では、ケーススタディとして入手可能な地震波形を活用し、建物の振動解析による倒壊判定を実施した。
4.2節では、上記の検討結果をもとに、今後30年程度の建物使用期間を考慮し、地震応答スペクトルから神戸 JIBANKUN を用いて入力地震動を作成するフローを提案した。

第5章では、フェーズ2における取り組みを中心に、5か年の研究を通じて得られた知見をまとめて列記した。



3. 神戸市の地震動特性を考慮した入力地震動に関する検討

3.1 地震動レベルに関する検討

神戸市において今後30年程度の建物使用期間の中での発生が想定される地震動レベルを把握するために,防 災科学技術研究所が公表している地震ハザードステーション「J-SHIS」を用いて検討を行った。

(1) 地震ハザードステーション「J-SHIS」の概要

J-SHIS とは地震防災に資することを目的に、日本全国の「地震ハザードの共通情報基盤」として活用される ことを目指して作られたサービスである。「全国地震動予測地図」の公開システムとして、2005 年 5 月より運 用が開始されている。地図そのものだけでなく、その作成の前提条件となった地震活動・震源モデル及び地下 構造モデル等の評価プロセスに関わるデータも公開されている。

「全国地震動予測地図」とは、将来発生の恐れのある地震による揺れの強さを予測し、250m メッシュの分解能で結果を地図表示したものである。地図には大きく、①確率論的地震動予測地図と②震源断層を特定した 地震動予測地図の2種類がある。

図-3.1.1 に示している確率論的地震動予測地図は、日本およびその周辺で起こりうる全ての地震に対して、 その発生可能性、規模を確率論的に評価し、さらにそれらの地震が発生したときに生じる地震動の強さをばら つきも含めて評価した結果を地図表示するものである。また、図-3.1.2 に示す震源断層を特定した地震動予測 地図は、ある特定の地震が発生した場合に各地点がどのように揺れるのかを計算して、その分布を地図表示す るものである。





図-3.1.2 震源断層を特定した地震動予測地図

(2) 検討地点の設定

研究会では実在する建設地点で検討を実施したが、本報では実在建物には住民が居住していることに配慮して、フェーズ1における検討と同様に仮想の建設地点を設定して検討を行った。したがって、定量的な評価の結果としての数値そのものは大きな意味はなさないが、神戸市における地震特性を理解し、各地点においてどのように振動解析用の入力地震動を設定するのか、について検討する上では、実在する建設地点での検討結果と同様な結論が得られたため、以降の検討では仮想の建設地点での結果を報告する。

仮想の建設地点は、表層地盤の違いによる影響を把握するために、神戸大学工学部地点(KU 地点)と神戸市役所地点(KC 地点)の2か所を設定した。J-SHIS上で表示した神戸市近傍に存在する主要活断層とKU 地点, KC 地点との位置関係を図-3.1.3 に重ねて示す。両地点ともに六甲・淡路島断層帯上に位置し、大阪湾断層帯、有馬-高槻断層帯、上町断層帯が比較的近傍に存在している。



<u>JSHISトップページ | 利用規約</u> | 本サイトに関するお問い合わせは **j-shis@bosai.go.jp**までお願いします。

(J-SHIS 表示画像を一部加工して作成)

図-3.1.3 検討地点(仮想の建設地点)と主要活断層の位置関係

(3)神戸市内における想定地震動レベルの分布

J-SHIS の確率論的地震動予測地図から今後 30 年内に 6%の確率(再現期間約 500 年に相当)で一定の揺れに 見舞われる地表最大速度の分布を求めた。図-3.1.4(a)に平均ケースを,図-3.1.4(b)に最大ケースによる分布を 示す。平均ケースとは、「主要活断層帯」の地震の長期評価では平均活動間隔および最新活動時期が幅をもって 評価されている場合が多いが、それぞれの中央の値をとって発生確率を計算したケースのことである。また、 最大ケースとは発生確率が最大になるように、平均活動間隔の最も短い値と最新活動時期の最も古い値を採用 して計算したケースのことである。なお、この分布図は 2019 年度に作成しており、報告書執筆時点で最新の 2020 年版や 2021 年 (NEID 作成版)の J-SHIS を用いた結果とは若干の差異が生じている可能性があることに 留意されたい。図-3.1.4(a)、(b)ともに傾向は同じで神戸市南部の市街地を中心にした地域や西区の西部地域付 近において、地表最大速度は比較的大きな値を示している。



(a) 平均ケース



(b) 最大ケース

図-3.1.4 今後 30 年内に 6%の確率で一定の揺れに見舞われる地表最大速度の分布

同様に今後 30 年内に 3%の確率(再現期間約 1,000 年に相当)で一定の揺れに見舞われる地表最大速度の分 布を求めた。図-3.1.5(a)に平均ケースを,図-3.1.5(b)に最大ケースの分布を図示する。地表最大速度は全体的 に図-3.1.4(a),図-3.1.4(b)よりも大きな値を示しているが,分布傾向は同じである。



(a) 平均ケース



(b) 最大ケース

図-3.1.5 今後30年内に3%の確率で一定の揺れに見舞われる地表最大速度の分布

(4) 神戸市内における地点別の想定地震動レベルの範囲

今後 30 年内に神戸市で発生する地震動レベルの範囲を把握するために,前掲の図-3.1.4 および図-3.1.5 に示した地震動分布について分析を行った。具体的には4 つの地点を対象に,30 年内 6%(再現期間約 500 年)の平均ケースと最大ケース,ならびに 30 年内 3%(再現期間約 1,000 年)の平均ケースと最大ケースの地震動レベルについて比較を行った。比較対象とした地点とは、市内最小地点、市内最大地点、KU 地点、KC 地点の4 箇所である。

図-3.1.6 に地表上の最大速度に関する比較結果を示す。まず確率別に比較すると、30 年内 3%の最大ケース が最も大きく、次いで、30 年内 3%の平均ケース、30 年内 6%の最大ケース、30 年内 6%の平均ケースの順に なっている。各地点における最大速度の範囲は以下のとおりである。なお、J-SHIS からは震度情報も得ること ができ、参考までに併記している。

<地表面の最大速度の範囲(再現期間約 500 年~1,000 年)>

- ・市内最小地点: 23~29cm/s (震度5強程度)
- ・市内最大地点: 113~143cm/s (震度6強程度)
- ・KU地点 : 26~34cm/s (震度5強程度)
- KC 地点 : 90~119cm/s (震度 6 強程度)

結果として、今後30年の建物使用期間を考慮し、その期間内に発生しうる現実的な地震動レベルを再現期間500年~1,000年と設定して求めた場合、市内で最も小さい地域は地表面の最大速度で30cm/s程度(震度5強程度)、大きい地域では最大速度150cm/s程度(震度6強程度)に備える必要があることが明らかになった。

建物振動解析による倒壊判定手法に用いる入力地震動を作成する場合には、このような地域毎の地震リスクの違いを考慮することが重要となる。方法としては、例えば、KU地点では地表面で最大速度 40cm/s 程度、KC 地点では最大速度 120cm/s を一つの目安として波形を作成することが考えられる。



図-3.1.6 確率論的予測地図に基づく地点別の想定地震動レベル(地表上の最大速度)

図-3.1.7 に工学的基盤上の最大速度に関する比較結果を示す。確率別に比較すると、地表上の場合と同様に、 30 年内 3%の最大ケースが最も大きく、次いで、30 年内 3%の平均ケース、30 年内 6%の最大ケース、30 年内 6%の平均ケースの順になっている。各地点における最大速度の範囲は以下のとおりである。

<工学的基盤上の最大速度の範囲(再現期間約 500 年~1,000 年)>

- ・市内最小地点: 40~49cm/s
- ・市内最大地点: 54~70cm/s
- ・KU地点 : 46~60cm/s
- ・KC地点 : 48~64cm/s

結果として、今後 30 年内に発生しうる現実的な地震動レベルを再現期間 500 年~1,000 年と設定して求めた 場合、市内で最も小さい地域は地表面の最大速度で 50cm/s 程度、最も大きい地域では最大速度 70cm/s 程度と なり、地表上の場合に比べると地域間の差は小さいことが確認された。

倒壊判定手法に用いる入力地震動を作成する場合には、上記の検討結果を参照して工学的基盤上での地震動 レベルを定めて、表層地盤を考慮した地震応答解析により地表上の波形を算出する方法も考えられる。



(b) 工学的基盤上の最大速度

図-3.1.7 確率論的予測地図に基づく地点別の想定地震動レベル

3.2 地震発生源に関する検討

(1)入手可能な地震波形の収集

地震動の多様性評価や実務者が容易に耐震性検討できるためには、解析対象地点において最も適した地震波 形が簡単に入手できることが理想である。そこで、入手可能な地震動を活用し、様々な地震発生源を考慮した 上で解析対象地点における地震動の特性を包含した入力地震動を設定するため、J-SHIS から地震波形を収集し て検討を行った。

J-SHIS の「震源断層を特定した地震動予測地図」とは、ある特定の断層で地震が生じた場合に各地点の揺れ の大きさを計算してその分布を地図に示したものである。J-SHIS 上では「想定地震地図」として、工学的基盤 上の地震動最大速度の分布図と地表の震度の分布図を確認することができる。また、250m 解像度で工学的基 盤上の地震動速度波形を入手することが可能である。

J-SHISの「想定地震地図」に搭載されている神戸市近傍の地震断層の一覧を表-3.2.1 に示す。合計7 断層に ついて 28 ケースの計算が行なわれている。事例として、図-3.2.1 に「六甲・淡路島断層帯主部淡路島西岸区 間(Mw6.6)」について、4 ケースの条件で計算された工学的基盤上の地震動速度分布図を示す。1 つの断層で あっても条件の異なる複数の断層破壊シナリオが数ケース設定されている。断層面上には、アスペリティと呼 ばれる主要な破壊領域(黒四角枠)が設定され、断層面上には破壊開始点(★印)が示されている。ケース毎 に2 方向の地震動速度波形が計算され、神戸市の場合は各地点で最大56 種類の地震動速度波形が入手できる。

	平均発生	最新活動	30年	50年	マグニチュ	
断層名	間隔	時期	発生確率※	発生確率※	ード	
	(年)	(年前)	(%)	(%)	(Mw)	
山崎新國准士堂政軍史	3 000	1 570	0	0	68	
口啊啊啊冒田工时时来即	5,900	1,570	(0.03~5%)	(0.06~8%)	0.0	
古公东园	6 500	1 270	0	0	62	
早台例眉	0,300	1,270	(ほぼの%)	()まぼの%)	0.5	
左 軍 首相將國共	1 500	424	0	0	7.1	
有局一同院的盾衔	1,500	424	(ほぼの~0.02%)	(ほぼの~0.04%)	/.1	
六甲・淡路島断層帯主部	2.150	25	0	0	6.6	
淡路島西岸区間	2,150	25	(ほぼ 0%)	(ほぼ0%)	0.0	
六甲・淡路島断層帯主部	1.950	470	0	0	7.2	
六甲山地南縁-淡路島東岸区間	1,850	470	(ほぼ0~0.9%)	(ほぼ 0~2%)	1.3	
士 贡 等 秀 明 年	5 000	(10	0	0	()	
入败得倒唐帝	5,000	610	(0.004%以下)	(0.007%以下)	0.9	
上町紫屋世	8 000	18 500	2.89	4.78	7.0	
上"马肉儿是出	8,000	18,500	(2~3%)	(3~5%)	/.0	

表-3.2.1 想定地震地図に搭載されている神戸市近傍の地震断層一覧

※ 30 年, 50 年発生確率:上段の確率は J-SHIS の表示に基づく。下段のカッコ内の確率は地震調査研究推進本部による活断層の長期評価に基づく。



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 (cm/s)



(2) 検討地点における工学的基盤上の地震動最大速度

上記の想定地震地図を用いて,KU地点とKC地点における工学的基盤上の地震動最大速度に関する情報を 整理した。

表-3.2.2 の KU 地点をみると, 六甲・淡路島断層帯主部六甲山地南縁-淡路島東岸区間で地震が発生した場合に最も大きな地震動の発生が想定されており, ケース3 では約 86cm/s と計算されている。3.1 節の検討結果では, 再現期間 500 年~1,000 年に対応した工学的基盤上の地震動は 46~60cm/s と求められており, 想定地震地図の結果はそれよりも大きな値になっている。地震動の大きさに着目すると, ケース2 の約 45cm/s や有馬-高槻断層帯のケース2 の約 43cm/s が再現期間 500 年~1,000 年に概ね対応している。

表-3.2.3 の KC 地点をみると, KU 地点と同様に六甲・淡路島断層帯主部六甲山地南縁-淡路島東岸区間で 地震が発生した場合のケース4 が最も大きく,約163cm/s と計算されている。再現期間 500 年~1,000 年に対応 した地震動の大きさは 48~64cm/s であり,その範囲を超えていることが確認できる。地震動の大きさの観点か らは,山崎断層帯主要南東部のケース2 や,有馬一高槻断層帯のケース1~ケース4,大阪湾断層台のケース1, ケース2,ケース4 が再現期間 500 年~1.000 年に概ね対応している。

想定地震地図から入手可能な地震波形を活用して倒壊判定手法に用いる入力地震動を作成する場合には、大 きく以下の5つの方法が考えられる。

- 1) 工学的基盤上の地震動速度波形をそのまま用いて、表層地盤特性を考慮した地表面の地震波形を作成
- 2) 再現期間 500 年~1,000 年の地震動レベルに対応した工学的基盤上の地震動速度波形を抽出して表層地 盤特性を考慮した地表面の地震波形を作成
- 3) 再現期間 500 年~1,000 年の地震動レベルに対応するように工学的基盤上の地震動速度波形を調整して 表層地盤特性を考慮した地表面の地震波形を作成
- 4) 工学的基盤上の地震動速度波形をそのまま用いて、表層地盤特性を考慮した地表面の地震波形を作成し、 再現期間 500 年~1,000 年の地震動レベルに対応した地表上の地震動レベルに調整
- 5) 工学的基盤上で全ての地震動の応答スペクトルを計算して包含する応答スペクトルを設定して,基盤波 形を作成。さらに表層地盤特性を考慮した地表面の地震波形を作成。再現期間 500 年~1,000 年の地震 動レベルへの対応は工学的基盤上,もしくは地表上で行う

表-3.2.2 工学的基盤上の最大速度(KU 地点:メッシュコード 5235017822)

(単位:cm/s)

断層名 ケース	1	2	3	4	5	6
山崎断層帯主部南東部 (4 ケース)	6.4 (3.9/4)	21.9 (4.2/4)	4.8 (3.6/3)	13.0 (3.9/4)	-	-
草谷断層 (2 ケース)	6.0 (3.8/4)	5.4 (3.9/4)	-	-	-	-
有馬-高槻断層帯 (4 ケース)	36.2 (4.9/5 弱)	42.6 (4.9/5 弱)	31.1 (4.9/5 弱)	42.2 (4.9/5 弱)	-	-
 六甲・淡路島断層帯主部 淡路島西岸区間 (4 ケース) 	11.7 (3.9/4)	4.3 (3.6/3)	4.3 (3.6/3)	4.2 (3.7/4)	-	-
六甲・淡路島断層帯主部 六甲山地南縁-淡路島東岸区間 (4 ケース)	32.1 (5.3/5 強)	44.8 (5.2/5 強)	86.0 (5.7/6 弱)	69.4 (5.6/6 弱)	-	-
大阪湾断層帯 (4 ケース)	24.4 (4.5/4)	13.3 (4.5/4)	33.8 (4.9/5 弱)	14.5 (4.6/4)	-	-
上町断層帯 (6 ケース)	15.4 (4.3/4)	17.3 (4.3/4)	9.9 (4.2/4)	9.1 (4.0/4)	10.7 (4.1/4)	7.6 (4.0/4)

※括弧内は(工学的基盤上の計測震度/地表の震度)

表-3.2.3 工学的基盤上の最大速度(KC地点:メッシュコード 5235012543)

(単位:cm/s)

断層名 ケース	1	2	3	4	5	6
山崎断層帯主部南東部 (4 ケース)	20.7 (4.8/6 弱)	58.9 (5.2/6 弱)	16.8 (4.7/6 弱)	38.3 (5.1/6 弱)	-	-
草谷断層 (2 ケース)	13.1 (4.8/6 弱)	16.7 (4.8/6 弱)	-	-	-	-
有馬-高槻断層帯 (4 ケース)	48.7 (5.3/6 強)	46.3 (5.3/6 強)	48.7 (5.4/6 強)	55.7 (5.4/6 強)	-	-
六甲・淡路島断層帯主部 淡路島西岸区間 (4 ケース)	23.6 (4.9/6 弱)	14.6 (4.8/6 弱)	10.7 (4.5/5 強)	15.0 (4.6/5 強)	-	-
六甲・淡路島断層帯主部 六甲山地南縁-淡路島東岸区間 (4 ケース)	125.3 (6.0/7)	162.8 (6.2/7)	145.1 (6.2/7)	162.9 (6.4/7)	-	-
大阪湾断層帯 (4 ケース)	70.7 (5.4/6 強)	53.5 (5.4/6 強)	89.1 (5.6/6 強)	50.1 (5.4/6 強)	-	-
上町断層帯 (6 ケース)	19.4 (4.7/6 弱)	20.8 (4.7/6 弱)	15.3 (4.6/5 強)	13.7 (4.7/6 弱)	21.2 (4.7/6 弱)	27.5 (4.8/6 弱)

※括弧内は(工学的基盤上の計測震度/地表の震度)

3.3 地震動評価における不確実性に関する検討

(1) 観測地震波形の抽出

「震源断層を特定しにくい地震」について、比較的発生頻度が高いマグニチュード7クラスの地震が発生した場合、建設地点の近傍では大きな地震動となる可能性がある。3.1節の確率論的な地震動評価では、「震源断層を特定しにくい地震」を含めた評価が行われているが、必ずしも建設地点の近傍で発生することが仮定されているわけではない。地震動予測に関する不確実性を考慮して予測できる地震動の範囲を鑑み、一般的に考えられる地震動レベルを適用する方法を検討するため、観測地震波形を抽出して分析を行った。

観測地震波形の抽出条件は以下のとおりである。結果として、208カ所の観測地点から416個の水平成分波形を抽出した。図-3.3.1に示すように、抽出した地震波形の気象庁マグニチュード(M)の範囲は3.2~7.5まで、計測震度の範囲は3.4~6.8まで含まれている。

<観測地震波形の抽出条件>

- 防災科学技術研究所強震観測網 K-NET, KiK-net (収集期間: 1996.1.1~2019.9.30)
- ・気象庁強震観測データ(収集期間:1993.1.15~2019.6.18)
- ・ 震央距離 10km 未満



図-3.3.1 208 地点から抽出した地震波形(合計 416 波形)に含まれる 気象庁マグニチュードと計測震度の範囲

(2) 抽出波形の地震動レベルと応答スペクトルに関する比較検討

a) 全波形を用いた場合(208 地点, 416 波形)

抽出した全波形について、図-3.3.2a)に計測震度の頻度分布を、b)に地表最大速度の頻度分布を示す。同図 a)の計測震度をみると、その範囲は前述のとおり 3.4~6.8 で、最頻値カテゴリは 4.5~4.6 であった。最大速度 の範囲は、同図 b)に示すように 0~182cm/s で、最頻値カテゴリは 10~20cm/s である。

図-3.3.3a)に加速度応答スペクトルを、b)に速度応答スペクトルを示す。同図 a)には参考として、耐震設計 で用いられている工学的基盤上の告示スペクトルを重ねて図示している。青線は稀に発生する地震動で、赤線 は極めて稀に発生する地震動に対応している。この図から分かるように、地表上と工学的基盤上の違いがある ため直接的な比較はできないが、告示スペクトルを超える地震動が確認できる。



図-3.3.2 抽出波形の地震動レベル(全波形)



図-3.3.3 抽出波形の応答スペクトル(全波形)

b) 気象庁マグニチュード M6.9 以下を対象にした場合(198 地点, 396 波形)

震源断層を特定しにくい地震動の規模については多くの議論があるが、政府専門機関の見解を参考に M6.5 ~6.9 程度する考え方がある。そこで、M6.9 以下を対象にして地震波形を再抽出して、全波形の場合と同様の検討を行った。198 カ所の観測地点から抽出した 396 波形について、図-3.3.4a)に計測震度の頻度分布を,b) に地表最大速度の頻度分布を示す。同図 a)の計測震度をみると、その範囲は 3.4~6.8 で、最頻値カテゴリは 4.5 ~4.6 であった。最大速度の範囲は、同図 b)に示すように 0~182cm/s で、最頻値カテゴリは 10~20cm/s であり、計測震度、最大速度ともに全波形の場合と大きな違いは認められなかった。

図-3.3.5a)に加速度応答スペクトルを、b)に速度応答スペクトルを示す。同図 a)には工学的基盤上の告示スペクトルを重ねて図示しているが、全波形の場合と同様に告示スペクトルを超える地震動が確認できる。



図-3.3.4 抽出波形の地震動レベル(M6.9以下)



図-3.3.5 抽出波形の応答スペクトル(M6,9以下)

c) 工学的基盤相当レベルの観測地点を対象にした場合(21地点,42波形)

告示スペクトルと比較する場合,工学的基盤上の地震波形を抽出する必要がある。そこで,工学的基盤相当の地盤として,AVS400m/s以上の岩盤上に設置されている観測地点を対象に波形の抽出を行った。21カ所の観測地点から抽出した42波形について,図-3.3.6a)に計測震度の頻度分布を,b)に地表最大速度の頻度分布を示す。同図 a)から計測震度の範囲は4.5~6.4 で,同図 b)から最大速度の範囲は0~80cm/s であり,計測震度,最大速度ともに全波形の場合よりも範囲は小さくなっていることが確認できた。

図-3.3.7a)に加速度応答スペクトルを,b)に速度応答スペクトルを示す。同図 a)には工学的基盤上の告示スペクトルを重ねて図示しているが、工学的基盤相当上で比較しても前述の検討結果と同様に告示スペクトルを 超える地震動が確認できる。



図-3.3.6 抽出波形の地震動レベル(工学的基盤相当: AVS400m/s 以上)



図-3.3.7 抽出波形の応答スペクトル(工学的基盤相当: AVS400m/s 以上)

以上のとおり、震央距離 10km 未満の波形記録を収集して、地震動レベルとスペクトル特性について考察す ると、告示スペクトルを超える観測波形が存在することが確認できた。このような設計レベルを超えるような 地震動の発生の可能性は、3.1 節で検討したような再現期間 500 年~1,000 年に対応する地震動レベルには含ま れていない。倒壊判定手法に用いるための入力地震動の作成においては、地震動レベルは再現期間 500 年~1,000 年程度などの現実的なレベルを設定する考え方が合理的である。一方で工学的基盤上の応答スペクトル特性は、 極近傍の観測波形の特性も包含するように設定し、さらに検討対象地点における表層地盤の特性も考慮するこ とが望ましいと考える。また、倒壊判定手法の適用に関しては、たとえばきわめて低い確率で発生する地震動 は考慮していないことなどの手法の限界について、十分な事前説明を建物所有者に対して行うことも重要なポ イントとして指摘される。

4. 倒壊判定のための入力地震動作成フローの提案

4.1 入力地震動の作成に向けた考え方の整理

第3章における検討結果を踏まえて倒壊判定手法に用いる入力地震動作成に向けた考え方を整理した。作成 方法には大きく以下 a)~d)の4つの方法が考えられる。

a) 入手可能な地震波形を活用する方法

入手可能な主な地震波形として,告示波,観測地震波,設計用地震波,想定地震波が挙げられる。観測地震 波や設計用地震波は比較的簡便に用いることができる利点がある。フェーズ1では,①神戸海洋気象台 NS 波, ②JR 鷹取 EW 波,③エル・セントロ NS 波,④タフト EW 波,⑤八戸 NS 波を使用して倒壊判定手法の適用に 関する事例検討を行っている。その詳細については巻末の付録を参照されたい。告示波と J-SHIS の「想定地震 地図」等から入手できる想定地震波は工学的基盤上の応答スペクトルや地震波形から地表上の波形を算定する 必要があるが,表層地盤の特性を考慮することができる利点がある。しかし,入手可能な地震波形を活用する 場合は、今後 30 年間の建物使用期間に発生しうる地震動レベルを必ずしも反映してはいない課題がある。

b) 現実的な地震動レベルの地震波形を抽出して活用する方法

入手可能な地震波形から現実的な地震動レベルの条件を設定し、条件を満足する地震波形を抽出して活用す る方法を挙げることができる。条件としては、例えば不動産の証券化に際して地震 PML を算出する場合に、 建物の使用期間を考慮して 50 年間での超過確率 10 %(再現期間 475 年)が用いられているように、経済的評 価の観点では今後 30 年内の発生確率が 6%(再現期間:約 500 年)の地震動と設定する方法が考えられる。あ るいは、耐震化は生命の安全に関わることや地震動予測の不確実性を考慮して、より厳しい条件となる今後 30 年内で 3%(再現期間:約 1,000 年)の採用も考え方としては合理的である。なお、発生確率 3%、または 6% を条件とする利点として、J-SHIS を活用することにより日本全国の各地点で各発生確率に対応した地震動レベ ルに関する情報が容易に得られることが挙げられる。一方で、工学的基盤上、または地表上で条件を満足する 地震波形を抽出することになるが、特定の地震波形のみを用いることになり、多様な地震動特性を反映させる ことが難しい課題がある。

c) 現実的な地震動レベルに調整した地震波形を活用する方法

多様な地震動特性を反映させるためには、入手可能な地震波形を網羅的に活用する方法が考えられるが、現 実的な地震動レベルに対応していない場合に調整が必要になる。工学的基盤上で地震波形を調整して地表面の 地震波形を作成する方法や、地表面の地震波形を調整する方法が考えられる。一方で単純に地震波形の振幅調 整を行った場合に、地震動の周期特性が影響を受けて変化してしまうことが課題として指摘される。

d) 工学的基盤上における包含的な応答スペクトルから地震波形を作成する方法

上記 c)とは別の方法で多様な地震動特性をより反映させる方法として、収集した全ての地震動波形について、 工学的基盤上で応答スペクトルを計算し、それらを包含する応答スペクトルを設定して基盤波形を作成した後 に、表層地盤特性を考慮して地表面の地震波形を算定する方法が挙げられる。工学的基盤上、または地表面上 で地震動レベルを調整する点は上記 c)と同じ考え方である。

4.2 入力地震動作成フローの提案

多様な地震動の特性を包含し、現実的な地震動レベルを反映した入力地震動の作成方法として、図-4.2.1 に 示す作成フローを提案する。本提案は 4.1 節における「d) 工学的基盤上における包含的な応答スペクトルか ら地震波形を作成する方法」の考え方をベースしている。

以下に作成手順を説明する。

<STEP1:地震動の多様性を考慮した工学的基盤上の地震波形の作成>

- 1)告示波,観測地震波,設計用地震波,想定地震波を入手して応答スペクトルを算定し,工学的基盤 上で応答スペクトルを算定する。
- 2) 上記応答スペクトルを包含する基盤スペクトルを設定する。
- 3) 工学的基盤上で地震動の基盤波を作成する。

<STEP2:現実的な地震動レベルの設定>

- 建物の使用期間を考慮して地震動レベルの条件を設定する。条件について、例えば今後30年内の発 生確率が6%(再現期間:約500年)や3%(再現期間:約1,000年)の地震動を設定すると、J-SHIS の「確率論的地震動予測地図」から情報を得ることができる。
- 2) J-SHISの想定地震地図を活用する場合は、工学的基盤上の地震波形と神戸「JIBANKUN」を用いて、 想定最大地表速度を算出する。神戸市の場合は7断層について28シナリオの想定地震から合計56 波形を活用することが可能である。なお、海溝型の地震は含まれていないことから、国や兵庫県の 地震被害想定資料等で想定される地震動レベルを確認する必要がある。
- 3) 上記, 1), 2) の検討結果から現実的な地震動レベル(想定最大地表速度)を決定する。

<STEP3: 建物の使用期間を考慮した地震波形の作成>

- 1) STEP1 で作成した工学的基盤上の地震波形について、「神戸 JIBANKUN」を活用して地表上の地震 波形を作成する。
- 2) STEP2 で決定した現実的な地震動レベルを満たすように地震波形を調整する。なお、地震波形の調整は地表上ではなく、工学的基盤上で調整する方法も採用できるものとする。ただし、具体的な調整方法については今後検討が必要と考える。



図-4.2.1 倒壊判定のための入力地震動作成フローとの提案

5. まとめ

本研究ではより合理的な耐震診断・補強方法の実現により、耐震診断や設計、補強等に従事する実務者の作業負担軽減を図り、中高層建物の耐震化促進に貢献することを目的として、今後30年程度の建物使用期間の中 で発生しうる最大級の地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊はしない性能の確保を目的とした「振動 解析による倒壊判定手法」の耐震診断・補強実務への導入可能性を検討した。

第1章では本研究の背景として,近年,既往の0.6以上を確保するIs値のみにとらわれることなく,建物の動的応答性状に着目した「振動解析による倒壊判定手法」に実務者の期待が寄せられていること,大阪府では地盤特性を考慮した地表地震波が公開されており,他の地域でもそのような振動解析のための入力地震動の公開が望まれていることを述べ,本研究の目的を説明した。

第2章では倒壊判定手法の概要を示した。倒壊判定手法は建物の振動解析結果から得られた最大応答層間変 形角を基準に建物が倒壊する可能性を判定する手法である。また、この手法を含めた耐震補強の進め方として 1次的補強、2次的補強の考え方の導入を想定していることを説明した。さらに本研究は5か年計画の中でフェ ーズ1とフェーズ2の2段階で進めており、フェーズ2を対象とした本報における研究の流れを説明するとと もに、本報告書の構成を示した。

第3章3.1節では、防災科学技術研究所が公開している地震ハザードステーション J-SHISの「確率論的地震 動予測地図」を活用し、今後30年程度の建物使用期間の中での発生が想定される神戸市での地震動レベルを検 討した。結果として、今後30年の期間内に発生しうる現実的な地震動レベルを再現期間500年~1,000年と設 定して求めた場合、市内で最も小さい地域は地表面の最大速度で30cm/s程度(震度5強程度)、最も大きい地 域では最大速度150cm/s程度(震度6強程度)に備える必要があることが明らかになった。一方で、工学的基 盤上では、市内で最も小さい地域は地表面の最大速度で50cm/s程度、最も大きい地域では最大速度70cm/s程 度となり、地表上の場合に比べると地域間の差は小さいことを確認した。また、建物振動解析による倒壊判定 手法に用いる入力地震動を作成する場合には、このような地域毎の地震リスクの違いを考慮することが重要に なることを指摘した。

3.2 節では、入手可能な地震波形を収集して、様々な地震発生源を考慮した上で、解析対象地点における地震動の特性を包含した入力地震動を設定するため、J-SHISの「想定地震地図」から地震波形を収集して検討を行った。神戸市では合計7断層について、28ケース(56種類)の地震動速度波形が入手可能である。これらの地震波形を用いて、仮想の建設地点2か所における工学的基板上の最大速度に関する情報を確認した上で、倒壊判定手法に用いる入力地震動を作成するための方法案を整理した。

3.3 節では地震動評価における不確実性を検討するため,防災科学技術研究所の強震観測網 K-NET と KiK-net, および気象庁の地震観測記録から震央距離 10km 未満の観測地点で記録された波形を抽出し,地震動レベルと 応答スペクトルについて考察を行った。結果として,告示スペクトルを超える観測波形が存在することを確認 した。このような設計レベルを超えるような地震動の発生の可能性に対して,現実的な地震動レベルを設定し て倒壊判定手法を適用した場合に,きわめて低い確率で発生する地震動は考慮していないことなどの手法の限 界について,建物所有者に対して事前に十分な説明を行う必要があることを指摘した。

第4章4.1節では,第3章における検討結果を踏まえて倒壊判定手法に用いる入力地震動作成に向けた考え 方を整理した。また,4.2節では、多様な地震動の特性を包含し、現実的な地震動レベルを反映した入力地震動 の作成するためのフローを提案した。 フェーズ2では、主に入力地震動の作成に関する検討を実施したが、フェーズ1では実建物を対象に補強前 と補強後の振動解析モデルを構築し、仮想の建設地点を設定して倒壊判定手法の適用性に関する事例検討を実 施している。その研究成果を以下に列記する。詳細については、本報告書巻末の付録や「神戸の減災研究会研 究成果報告書(平成27~29 年度)³」を参照されたい。

<フェーズ1における主な研究成果>

- ・ 今後 30 年程度の建物使用期間の中で発生しうる最大級の地震に対して、建物は再使用できなくても倒壊はしない性能の確保を目的とした「振動解析による倒壊判定手法」の耐震診断・補強実務への導入可能性を検討した。
- の確率論的な評価手法を適用した結果、同じ神戸市内であっても、建設地の位置や地盤の影響等により 想定しておくべき地震発生源や地震規模は異なることや、南海トラフや主要活断層による地震以外に、 震源断層を予め特定しにくい地震も検討する必要があることを確認した。
- ・解析対象建物に対して振動解析による倒壊判定を適用し、その適用可能性を検討した結果、補強前の建物は1階部分の最大応答層間変形角が倒壊する可能性が大きいレベルまで達したが、1階のピロティ部分のみを対象に簡易的な補強を施すことにより、1階部分が倒壊する可能性を大きく低減する効果が解析結果から認められた。
- 入力地震動の作成要件を検討し、ワーストケース地震シナリオの設定における地震発生源の選定や地震 規模の設定、地震動評価における不確実性の扱い、震源断層を予め特定しにくい地震の扱いを含めて、 「振動解析による倒壊判定手法」のための入力地震動を設定するための考え方を整理した。

また、倒壊判定手法の適用にあたり、残された課題を以下に列記する。

- ・「振動解析による倒壊判定手法」の適用性に関しては、解析事例を増やして倒壊判定手法の検証を進め るとともに、振動解析モデルの精緻化や解析手法の標準化に向けた検討が必要。
- ・入力地震動の作成に関しては、海溝型地震の考慮や、「神戸 JIBANKUN」を活用して表層地盤の影響を 考慮した具体的な地震波形の作成が必要。また、現実的な地震動レベルに調整する手法の整理が必要。
- ・ 短い間隔で複数回の揺れが発生した場合の対応や地震波形の公開方法,建物所有者を含む関係者とのリ スクコミュニケーションに関する検討が必要。

参考文献

- 1) (社)建築研究振興協会:既存建築物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル 2003 年版, 2003.
- 2) 沖村孝,田中泰雄,鎌江伊三夫,大星直樹,鳥居宣之,川下光仁:地盤情報データベースとGISの活用による都市災害および都市開発の検討,土と基礎,48号,pp.27-29,2000.
- 神戸の減災研究会:研究成果報告書(平成 27~29 年度), 2018., http://kobe-gensai.com/index.html(最終閲覧日:2022 年3月1日)
- 4) J-SHIS: 地震ハザードステーション, http://www.j-shis.bosai.go.jp/(最終閲覧日: 2022年3月1日)

<付録> 振動解析による倒壊判定手法の適用事例

参考として、フェーズ1において実施した「振動解析による倒壊判定手法」の適用可能性に関する事例検討 について、「神戸の減災研究会研究成果報告書(平成27~29年度)³」から当該箇所の内容を転載する。

(1)解析対象建物の概要

解析対象とした建物の概要を付表-1 に示す。対象建物は神戸市の協力のもと、建物の構造と兵庫県南部地 震による被災履歴が明らかな神戸市に実在する8階建ての中高層集合住宅を選定した。被災履歴が明らかな建 物を選定した理由は、地震応答解析において兵庫県南部地震による被災程度や箇所を再現することにより、よ り現実に即した解析モデルを構築するためである。1階~4階までは柱と梁に充腹形の鉄骨材が使用されたSRC 構造、5階以上は RC構造で、新耐震設計基準が適用される以前の1979年に建設されている。

付図-1に3階部分の床伏図を示す。X 方向(桁行方向)は、X1-X2間に設置されている外部階段を除くと 7スパンで、Y 方向(張間方向)は1スパンの建物規模である。付図-2a)とb)に A 通り(バルコニー側)と D 通り(廊下側)の軸組図を示す。1階はピロティ構造で駐輪等のスペースになっており、2階以上は居住空間 に使用されている。典型的な集合住宅の特徴として、X 方向は耐震壁に開口部を有したラーメン構造、Y 方向 は各戸境に耐震壁を配置した耐震壁付ラーメン構造である。

解析対象建物は耐震診断(二次診断)が実施されているが、Is値は0.6は満足していない。

所在地	神戸市内			
階数・構造	5~8階 RC造			
	1~4 階	SRC 造(充腹形鉄骨)		
延床面積	2721.3m ²			
建物高さ		22.9m		
建築年	1979			
基礎構造		杭基礎		

付表-1 解析対象建物の概要



付図-1 3階床伏図



(2) 兵庫県南部地震による被災状況

解析対象建物は 1995 年 1 月に発生した兵庫県南部地震により 1 階のピロティ部分に被害が集中した。図-3.2.1 に被害状況の写真を示す。主な被害として、付図-3 a)に示すように、1 階の柱の一部に主筋の座屈や被り コンクリートの剥落が確認された。また、柱際の腰壁や垂壁のコンクリートが圧壊した箇所や、付図-3b)のよ うに短柱化した袖壁がせん断破壊している箇所があった。階段室まわりについても外壁端において主筋の座屈 や被りコンクリートの剥落が確認された。



a) 1 階柱脚筋の座屈状況

b) 短柱化した1階袖壁のせん断破壊状況

付図-3 兵庫県南部地震による被災状況

(3) 振動解析の概要

解析対象建物について、倒壊判定手法の実現可能性を検討するために振動解析モデルを構築して地震応答解 析を行った。振動解析モデルは耐震補強前と耐震補強後の2種類を構築した。構造解析プログラムは質点系振 動解析や3次元立体フレームの時刻歴応答解析が可能な構造計画研究所の汎用ソフトウェア「RESP-D ver.3.3.0.0」を使用した。各解析における共通の条件を付表-2に示す。

粘性減衰	初期剛性比例型(2%)
数值積分法	平均加速度法
計算時間間隔	0.001 秒

付表-2 共通の解析条件

入力地震動は、観測地震波から①神戸海洋気象台 NS 波、②IR 鷹取 EW 波、および設計用地震波から③エル・ セントロ NS 波、④タフト EW 波、⑤八戸 NS 波の計 5 波を使用した。なお、③~⑤の設計用地震波は最大速 度振幅 50cm/s で基準化した波形を用いた。解析に使用した入力地震動の波形を付図-4 に、各波形の加速度応 答スペクトル(減衰 5%)を付図-5 に示す。



付図-4 入力地震動波形



付図-5 加速度応答スペクトル(減衰5%)

- (4) 補強前の建物の地震応答解析
- a) 振動解析モデルの構築

補強前の建物の振動解析モデル(3次元立体フレーム)を付図-6に示す。モデルは解析対象建物を参考に 1979年に建設された8階建ての集合住宅で,構造は1~4階はSRC造,5階以上はRC造として構築した。

ここで、「RESP-D」等の一般の設計用解析プログラムでは、耐震壁に大きな開口部がある場合は、安全側の 判断として非耐震壁として扱われ、剛性、耐力ともにフレームに反映されず、その結果、2~8 階はバルコニー 側、廊下側ともにX方向(桁行方向)は純ラーメン構造となる。この条件でモデルを構築して振動解析を実施 したところ5~7 階に大きな応答が得られ、兵庫県南部地震で1 階部分に被害が集中した被災状況を再現するこ とができなかった。そこで、今回の解析では兵庫県南部地震における被災状況を再現できるように 2~8 階の開 口部付き耐震壁の剛性、耐力の調整を行った上で解析を行った。したがって、解析対象建物に対して、振動解 析モデルは、1 階部分の構造は極力厳密に再現しているが、2 階以上は調整を加えた想定建物である点に留意さ れたい。

付表-3 に各層の建物重量を, 付図-7 に荷重増分解析から得られた X 方向(桁行方向)の正加力時における各階のせん断力変形曲線を示す。



付図-6 補強前の建物の振動解析モデル(3次元立体フレーム)

層	Wi	Σ Wi	А	Wi⁄A
	(kN)	(kN)	(m^2)	(kN/m^2)
8	5,160	5,160	377.36	13.67
7	5,418	10,578	377.36	14.36
6	5,295	15,873	377.36	14.03
5	5,299	21,173	377.36	14.04
4	5,324	26,496	377.36	14.11
3	5,327	31,823	377.36	14.12
2	5,327	37,151	377.36	14.12
1	6,132	43,283	377.36	16.25

付表-3 各層の建物重量

※ Wi:層重量,A:各層の床面積,Wi/A:各層の単位床面積あたりの重量



付図-7 補強前の建物のせん断力変形曲線(X方向正加力)

b) 振動解析結果

「RESP-D」を用いて質点系振動解析と3次元立体フレームの時刻歴応答解析を行った。解析結果から得られた1次固有周期について、質点系振動解析は0.243秒、立体フレーム解析は0.271秒であった。付表-4a)とb) に質点系振動解析および立体フレーム解析の結果から得られた最大応答層間変形角の一覧を示す。また、付図-8a)とb)にそれぞれの結果を図化したグラフを示す。2種類の解析方法ともに1層の層間変形角が大きく、兵庫県南部地震による被災状況を一定再現できていることを確認した。

最大応答層間変形角について,設計用地震波3波による解析結果は全てのケースで1/100rad以下であり,倒 壊する可能性は小さいと考えられる。しかし,実際に観測された地震波による解析結果は,より大きな応答値 が得られており,設計波を上回る地震動の発生を考慮する必要がある。特に神戸海洋気象台 NS 波を用いた解 析結果からは,質点系振動解析において1層の最大応答層間変形角が1/50radを超えており,本文p3の表-2.1.1 における倒壊判定基準の例に照らすと、「部分的または建物全体が倒壊する可能性が大きい」という結果になっ た。また、立体フレーム解析においても最大応答層間変形角は1/59radとなり、「倒壊はしないが、構造体の損 傷がある」という結果が得られた。

付表--4 最大応答層間変形角一覧

(rad)

(rad)

a) 質点系振動解析結果<補強前>

困	神戸海洋気象台	JR 鷹取	エル・セントロ	タフト	八戸
眉	NS 波	EW 波	NS 波	EW 波	EW 波
8	1 / 5,281	1 / 4,806	1 / 5,648	1 / 5,285	1 / 5,945
7	1 / 1,705	1 / 1,210	1/3,052	1 / 1,614	1 / 3,469
6	1 / 424	1/393	1 / 526	1/419	1 / 2,556
5	1/360	1/345	1/416	1/357	1 / 745
4	1 / 180	1 / 259	1 / 407	1 / 291	1/611
3	1 / 84	1 / 172	1/357	1/234	1 / 546
2	1 / 54	1 / 132	1 / 299	1/211	1 / 536
1	1/35	1/80	1/172	1 / 141	1/338

b) 立体フレーム解析結果<補強前>

困	神戸海洋気象台	JR 鷹取	エル・セントロ	タフト	八戸
眉	NS 波	EW 波	NS 波	EW 波	EW 波
8	1 / 277	1 / 928	1 / 2,001	1 / 1,508	1 / 3,495
7	1 / 203	1 / 450	1/918	1 / 670	1 / 1447
6	1 / 139	1 / 279	1 / 554	1/396	1 / 855
5	1 / 103	1/214	1/430	1/288	1 / 737
4	1 / 89	1 / 185	1 / 401	1 / 249	1 / 724
3	1 / 82	1 / 164	1/387	1/235	1 / 632
2	1 / 80	1 / 161	1/393	1/251	1 / 593
1	1 / 59	1 / 124	1/217	1 / 181	1/379





(5) 倒壊防止を目的とした補強後の建物の地震応答解析

a) 振動解析モデルの構築

補強前の建物の分析結果では1層の最大応答層間変形角が大きくなり、質点系振動解析では倒壊する可能性 が高い結果となった。そこで、倒壊防止を目的とした簡易な補強による効果を確認するため、1層のバルコニ 一側、廊下側の各1か所ずつに耐震壁を増設した場合を仮定して振動解析を行った。耐震壁の壁厚は20cm と 30cmの2パターンとした。耐震壁の増設箇所を付図-9に示す。補強後の建物について、付表-5に各層の建 物重量を示す。また、付図-10と付図-11に壁厚20cmおよび30cmの耐震壁増設後の各振動解析モデルにつ いて、荷重増分解析から得られたX方向(桁行方向)の正加力時における各階のせん断力変形曲線を示す。





層		Wi	$\Sigma \mathrm{Wi}$	А	Wi⁄A
		(kN)	(kN)	(m ²)	(kN/m^2)
	8	5,160	5,160	377.36	13.67
	7	5,418	10,578	377.36	14.36
6		5,295	15,873	377.36	14.03
5		5,299	21,173	377.36	14.04
	4	5,324	26,496	377.36	14.11
	3	5,327	31,823	377.36	14.12
	2	5,327	37,151	377.36	14.12
1	耐震壁 20cm	6,222	43,372	377.36	16.49
1	耐震壁 30cm	6,261	43,412	377.36	16.59

付表-	-5	各層の)建物	重量
1111	•		/ / = 1/.	エエ

※ Wi: 層重量, A: 各層の床面積, Wi/A: 各層の単位床面積あたりの重量



付図-10 耐震壁増設後(壁厚 20cm)の建物のせん断力変形曲線(X方向正加力)



b) 振動解析結果

① 壁厚 20cm の耐震壁を増設した場合

補強前の建物と同様に質点系振動解析と3次元立体フレームの時刻歴応答解析を行った。1次固有周期は, 質点系振動解析の場合は0.239秒,立体フレーム解析の場合は0.252秒であった。付表-6a)とりに質点系振動 解析および立体フレーム解析の結果から得られた最大応答層間変形角の一覧を示す。また,付図-12a)とりに それぞれの結果を図化したグラフを示す。2種類の解析方法ともに1層の層間変形角は補強前より減少し,JR 鷹取波を用いたケースも1/100rad以下となった。また,神戸海洋気象台波を用いたケースにおいても質点系解 析では倒壊する可能性が大きいという結果であったが,補強後は1/50rad以下となり,倒壊判定基準の例に照 らすと倒壊はしないレベルまで応答が抑えられている。立体フレーム解析についても1層の層間変形角は 1/59radから1/89radに減少している。

付表--6 最大応答層間変形角一覧

a)質点系振動解析結果<耐震壁増設(20cm)>					(rad)
屈	神戸海洋気象台	JR鷹取	エル・セントロ	タフト	八戸
一	NS 波	EW 波	NS 波	EW 波	EW 波
8	1 / 4,903	1 / 4,294	1 / 5,204	1 / 5,023	1 / 5,747
7	1/633	1 / 511	1 / 1199	1 / 830	1/3,360
6	1/305	1 / 280	1/357	1/325	1 / 1,661
5	1/214	1 / 228	1/301	1/273	1/610
4	1 / 112	1 / 175	1/288	1/223	1 / 534
3	1 / 69	1 / 141	1 / 270	1 / 195	1 / 530
2	1 / 59	1 / 159	1/330	1/231	1/618
1	1 / 51	1 / 151	1/302	1/230	1 / 583

a) 質占系振動解析結果 < 耐雲辟地設 (20cm) >

b) 立体フレーム解析結果<耐震壁増設(20cm)>

b)立体フレーム解析結果<耐震壁増設(20cm)>					(rad)
困	神戸海洋気象台	JR 鷹取	エル・セントロ	タフト	八戸
層	NS 波	EW 波	NS 波	EW 波	EW 波
8	1 / 150	1/639	1 / 1,518	1 / 1,183	1 / 1,607
7	1 / 123	1/320	1 / 704	1 / 580	1 / 807
6	1 / 94	1 / 204	1 / 432	1/333	1 / 624
5	1 / 89	1 / 167	1/332	1/239	1 / 579
4	1 / 82	1 / 160	1/311	1/210	1 / 588
3	1 / 81	1 / 165	1/322	1/211	1 / 574
2	1 / 97	1 / 222	1/419	1/277	1 / 694
1	1 / 89	1 / 250	1/372	1/285	1 / 550





② 壁厚 30cm の耐震壁を増設した場合

1次固有周期は、質点系振動解析の場合は0.238秒、立体フレーム解析の場合は0.247秒であった。付表-7a) と b)に質点系振動解析および立体フレーム解析の結果から得られた最大応答層間変形角の一覧を示す。また、 付図-13a)と b)にそれぞれの結果を図化したグラフを示す。2種類の解析方法ともに1層の層間変形角は大き く低減され、質点系振動解析において神戸海洋気象台波を用いたケースを除き、全て1/100rad以下の応答に収 まっている。一方、上層階の中には補強前よりも最大応答層間変形角が顕著に増大したケースがみられた。例 えば、質点系振動解析において神戸海洋気象台波を用いた場合に、2層の最大応答層間変形角は1/52radで、3 層は1/57radであり、補強前よりも上層階で層崩壊が発生する可能性が高くなる結果となった。

付表--7 最大応答層間変形角一覧

a)質点系振動解析結果<耐震壁増設(30cm)>					(rad)
屈	神戸海洋気象台	JR 鷹取	エル・セントロ	タフト	八戸
一	NS 波	EW 波	NS 波	EW 波	EW 波
8	1 / 4,678	1 / 4,203	1 / 5,323	1 / 4,981	1 / 5,773
7	1/475	1 / 459	1 / 1503	1 / 754	1/3,406
6	1/273	1 / 266	1/377	1/317	1 / 1,352
5	1 / 132	1 / 200	1/322	1/261	1 / 582
4	1 / 83	1 / 156	1/300	1 / 207	1 / 487
3	1 / 57	1 / 129	1/278	1 / 179	1 / 484
2	1 / 52	1 / 158	1/345	1 / 220	1 / 558
1	1 / 87	1/267	1/422	1/305	1 / 708

b) 立体フレーム解析結果<耐震壁増設(30cm)>

R	神戸海洋気象台	JR 鷹取	エル・セントロ	タフト	八戸
眉	NS 波	EW 波	NS 波	EW 波	EW 波
8	1 / 164	1 / 586	1 / 1,171	1 / 1,118	1 / 1,794
7	1 / 132	1 / 295	1/618	1 / 533	1 / 839
6	1 / 100	1 / 190	1/397	1/314	1 / 573
5	1 / 84	1 / 160	1/314	1 / 229	1 / 510
4	1 / 78	1 / 157	1 / 299	1 / 204	1 / 515
3	1 / 80	1 / 173	1/318	1 / 208	1 / 523
2	1 / 104	1/256	1 / 429	1 / 293	1 / 670
1	1 / 125	1/369	1/517	1/392	1 / 669

(rad)



(6) 倒壊判定手法の適用可能性

振動解析において補強前の応答が大きかった1階のピロティ部分のみを対象に、簡易的な補強として集合住 宅のバルコニー側と廊下側に1か所ずつ耐震壁を増設した補強効果の確認を行った。付図-14 a)~e)に質点系 振動解析について入力地震動毎に補強前と補強後の最大応答層間変形角の比較結果を示す。補強後については 壁厚 20cm と 30cm の耐震壁を増設した場合を併せて示している。また、付図-15 a)~e)に立体フレーム解析に ついて同様の比較結果を示す。

2 種類の解析方法ともにピロティ部分の補強のみでも1 層部分が層崩壊する可能性を大きく軽減する効果が 得られた。一方,部分的に補強を施した今回の解析事例からは、神戸海洋気象台波や JR 鷹取波のように建物 がある程度塑性化するようなレベルの地震動に対しては補強効果が認められたが、通常の設計レベルの地震動 に対しては効果が表れにくい結果が得られた。

耐震壁の壁厚を 20cm と 30cm にした場合を比較すると、30cm にした場合の方が1層部分の応答層間変形角 が小さくなっているが、反対に上層階の応答値が増加しているケースがみられた。したがって、部分的に過剰 な補強を行うと、未補強部分に大きな影響を与えてしまうことがある点に留意する必要がある。

質点系振動解析と立体フレーム解析の結果を比較すると必ずしも応答値は一致しないが、同様の傾向が得ら れることが明らかになった。合理的な補強設計を行う上ではより精緻な解析手法である立体フレーム解析の採 用が望ましいが、実務者の立場からは比較的扱いやすい質点系振動解析による方法の適用が期待されている。 今回の検討範囲では、質点系振動解析の方が比較的大きい応答値を算出しているが、倒壊判定の目的に照らす と安全側の評価となるため、適用性に大きな問題があるとはいえないと考える。今後の課題として解析事例を 増やして倒壊判定手法の適用性の検証を進めるとともに、振動解析モデルの精緻化や解析手法の標準化に向け た検討が必要である。